

文章编号: 1001-4322(2007)10-1619-04

非线性相移对 Z-scan 曲线对称性的影响

王 超^{1,3}, 唐天同¹, 康轶凡²

(1. 西安交通大学 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049; 2. 西北大学 物理系, 西安 710069;
3. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

摘 要: 基于由光束传输的 $ABCD$ 矩阵得出的 Z -scan 透过率的解析结果, 分析了 Z -scan 实验曲线随非线性相移的变化规律。发现随着相移的增加, 折射非线性相移比吸收非线性相移对 Z -scan 曲线对称性的影响更大。对于具有强饱和和吸收和弱自聚焦特性的非线性介质, 其 Z -scan 曲线随非线性折射相移的变小将失去典型的类色散特点。对于 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 ZnCdSe-ZnSe 多量子阱, 扫描光源采用 $532\ \text{nm}$ 的基模高斯光束, 采用透过率表达式来拟合所得的实验数据, 在吸收非线性相移为 0.9 与耦合因子为 -10 条件下, 推算出三阶非线性吸收系数为 $2 \times 10^{-3}\ \text{cm}^2/\text{W}$, 三阶非线性折射系数为 $8.0 \times 10^{-8}\ \text{cm}^2/\text{W}$, 这与 J. Ma 等人的结果吻合。最后对曲线特征参数随非线性相移变化进行了数值计算, 得到的曲线所对应的非线性相移与曲线谷位置的乘积近似为一常量, 值为 0.166 。

关键词: 非线性相移; Z -scan 方法; 定量分析; 类色散; 不对称性

中图分类号: O435; O437

文献标识码: A

自从 1989 年 Sheik-Bahae 等人发明 Z -scan 方法以来^[1], 人们建立了多种理论模型来模拟 Z -scan 方法的测量原理, 更有诸多的理论^[2-7] 计算相继被用于分析求解其透过率的表示形式。但遗憾的是, Z -scan 曲线的对称性随非线性相移的定量变化规律始终没有得到阐述。我们根据 Z -scan 透过率的解析结果, 定量讨论了其透过率曲线随非线性相移——折射非线性相移和吸收非线性相移——的变化特点, 得到了其对称性变化的规律。另外, 对具有特殊三阶非线性属性介质的 Z -scan 曲线的特点也做了讨论。

1 理论分析

为简化起见, 仅考虑介质的三阶非线性效应。按照与参考文献[2]相类似的处理方法, 采用无像散近似模型, 假设在穿越介质时光束的半径不变而仅有附加的非线性相移。在同时考虑三阶非线性折射和吸收的情况下, 当光束通过厚度为 L 的非线性介质时, 其所经历的非线性相移可表示为

$$\phi(r, z) = k \ln[1 + q(r, z)] \quad (1)$$

式中: $q(r, z) = I(r, z)L_{\text{eff}}$; 是其非线性吸收系数; k 为探测光束的波矢大小; m 为介质的克尔常数; $I(r, z)$ 为探测光束的光强; L_{eff} 是考虑了吸收后样品的等效厚度; $q(r, z)$ 是吸收非线性相移。由于在傍轴近似下, 高斯光束的等相位面近似为球面, 因而在考虑高斯激光束传输和变换时可以将其视为球面波。我们的分析仅限于光束的径向相位变化, 而这与透镜对球面波相位分布的影响所致几乎是相同的^[8]。因此, 在这个意义上可以将实验条件下的非线性介质等效为一焦距为 F 的透镜。由式(1)可得

$$F = \frac{kr^2}{m \ln[1 + q(r, z)]} \quad (2)$$

式中: 耦合因子 $m = 2k / \dots$ 。式(2)表述了 Z -scan 测量过程中三阶折射非线性和吸收非线性的耦合作用。这里, 引入高斯光束的复参数 q 以简化其传输问题。从厚度为 L 的样品的前表面到达距离其后表面长度为 d 的探测孔径处, 其传输矩阵可由 $ABCD$ 定理求得^[9]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - d/F & d \\ -1/F & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设某一时刻样品在 z 处, 其前表面光场及 q 参数表示如下

* 收稿日期: 2007-03-14; 修订日期: 2007-08-28

基金项目: 中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室基金资助课题(YA K200601)

作者简介: 王 超(1982—), 男, 博士, 从事电子光学研究; w.c521@126.com。

$$\frac{1}{q_i} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{2}{kw^2(z)}, \quad E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp[-i\phi(z)] \exp\left[-i \frac{kr^2}{2q_i}\right] \quad (4)$$

则穿越样品且紧挨其表面处的 q 及光场表达式为

$$\frac{1}{q_o} = \frac{1}{q_i} - \frac{1}{F}, \quad E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp[-i\phi(z)] \exp\left[-i \frac{kr^2}{2q_o}\right] \quad (5)$$

式中:下标 i 和 o 分别表征样品的入射面与出射面。此后,光将自由传播至距离样品后表面为 d 的孔径处,设此时特征参数为 q_a ,光斑半径为 w_a 及波前曲率半径为 R_a 。由光束传输和变换的 $ABCD$ 定理可得 $q_a = q_o + d$ 。

为简化计算起见,设 $s = 1/R(z) - 1/F, t = 2/kw^2(z), q_a = 1/(s - it) + d$,进而可得探测孔径处的光场

$$E_a(r, z) = E_0 (w_0/w_a) \exp[-i\phi(z)] \exp[-ikr^2/2q_a] \quad (6)$$

利用 q 参数的变换规律便可得到孔径处的电场表达式 E_a ,进而推理出其透过率的表示式

$$T = \frac{1}{1 - \frac{4mx - 1}{2(1+x^2)^2} q_{00} + \frac{4m^2 + 1}{4(1+x^2)^3} q_{00}^2} \quad (7)$$

式中: x 表示样品扫描过程中位置的物理量,以光束的瑞利散射长度为单位; $q_{00} = I_0 L_{\text{eff}}$,表示 Z -scan 实验中透镜焦点处的吸收非线性相移。类比 q_{00} ,引入 $\phi_0 = k I_0 L_{\text{eff}}$,以表示同样位置处的非线性折射相移,那么有 $m = 2 \phi_0 / q_{00}$ 。

以上分析同时考虑了三阶非线性吸收和非线性折射,而对仅考虑非线性折射(闭孔 Z -scan 测量)和非线性吸收(开孔 Z -scan 测量)的情形,可分别由式(7)在 $m \neq 0$ 和 $m = 0$ 条件下得到其标准透过率 T 的表达式。

2 讨 论

下面以 m 因子为对象,对比分析讨论吸收非线性和折射非线性对 Z -scan 曲线对称性的影响(这里仅涉及 $m > 0$ 的情况, $m < 0$ 与之类似)。图 1(a) 给出了等值非线性相移条件下曲线对称性随相移的变化。由图 1 可知,随着相移的增加,曲线的形状非常类似于仅考虑三阶非线性折射的情形,也就是说,相对于吸收非线性,折射非线性相移对 Z -scan 曲线对称性的影响更大一些。对某一吸收非线性相移 $q_{00} = 0.5$,当折射对吸收的非线性相移之比增加至 6 时,非线性吸收相移对曲线对称性的影响可以忽略,这可由图 1(b) 得知。

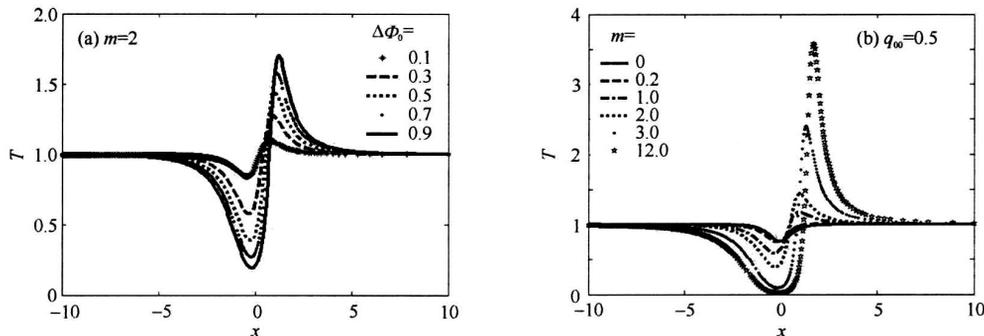


Fig. 1 Characteristics of Z -scan curves with equivalent nonlinear phase distortion

图 1 非线性相移畸变条件下的 Z -scan 透过率曲线

当然,对具有强的饱和吸收和弱的自聚焦特性的非线性介质,其理论 Z -scan 曲线如图 2 所示。由图可知,在同一吸收非线性相移的条件下,随着三阶非线性折射相移 ϕ_0 的变小(由 m 因子的值可得),曲线将失去其典型的类色散特点。透过率曲线将全部位于 $T = 1$ 的上方,伴随着谷的消失将在其前后几乎对称的位置出现两个透过率极值,也即曲线有两个峰。

根据引入的 m 耦合因子,将式(7)作为理论来拟合实验数据,便可由一 Z -scan 实验曲线同时演绎出两个重要的参数:三阶非线性吸收系数 $\chi^{(3)}$ 与三阶非线性折射系数 $\chi^{(3)}$,我们对此进行了实验验证。样品是在 GaAs 衬底上用金属-氧化物化学气相沉积法制备的 $1 \mu\text{m}$ 厚的 ZnCdSe-ZnSe 多量子阱,光源是波长为 532 nm 的基模高斯光束。我们对所得的实验数据用式(7)进行拟合,在 $q_{00} = 0.9$ 与 $m = -10$ 条件下得到了最佳的拟合效果,如图 3 所示。由此推算出 $\chi^{(3)} = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{W}$, $\chi^{(3)} = 8.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{W}$,这与文献[10]的结果几乎相同($g = -8.6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{W}$)。同时也可看出,较之通常 Z -scan 分析中所要求的两组数据对应之比这样繁琐的数据处理过程,以上三阶非线性特征参数的得出过程显得更加的简洁。

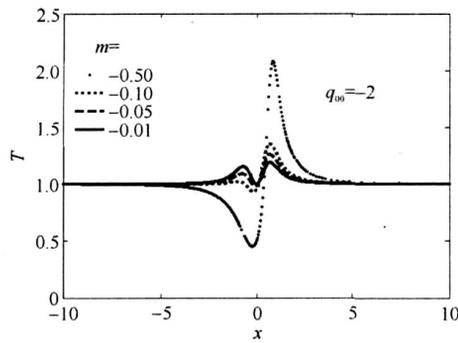


图 2 Theoretical Z-scan curves of media with stronger saturation absorption and weak self-focusing
图 2 具有强非线性饱和和吸收和弱自散焦三阶非线性特性的介质的理论 Z-scan 曲线

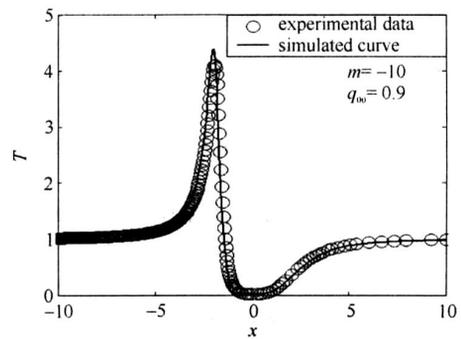


Fig. 3 Z-scan transmittance of ZnCdSe-ZnSe/GaAs MQWs using picosecond pulses at $\lambda = 532$ nm
图 3 ZnCdSe-ZnSe/GaAs MQWs 在 532 nm 激光作用下的 Z-scan 实验数据及拟合曲线

另外我们也定量计算了 Z-scan 曲线的特征参数随非线性相移的变化特点, 计算结果如表 1 所示, 相应的 Z-scan 曲线如图 4 所示。其中的 x_v , x_p 和 x_{p-v} 分别表示曲线谷的位置、峰的位置和峰谷位置之间的距离。对自聚焦介质, 由表 1 的数值结果知, 随着非线性相移的增加, 其 Z-scan 曲线的峰和谷均向正的方向移动, 但相对而言峰移动得更快一些, 这就导致了峰谷间隔加大, 曲线的对称性变差。但折射非线性相移与其所对应的谷的位置乘积之绝对值将近似保持常量 0.166。

表 1 仅考虑折射非线性条件下 Z-scan 曲线的特征参数随非线性相移变化的数值结果

Table 1 Characteristic parameters of Z-scan curves vs nonlinear phase shifts with purely nonlinear refraction

0	x_v	x_p	$ x_v - 0 $	x_{p-v}
1	-0.158 0	1.150 5	0.158 0	1.308 5
2	-0.082 2	1.479 6	0.164 4	1.561 8
3	-0.055 2	1.715 7	0.165 6	1.770 9
4	-0.041 5	1.904 3	0.166 0	1.954 8
5	-0.033 3	2.063 6	0.166 5	2.096 9
6	-0.027 7	2.202 4	0.166 2	2.230 1
7	-0.023 8	2.326 5	0.166 6	2.353 8
8	-0.020 8	2.439 1	0.166 4	2.459 9
9	-0.018 5	2.542 5	0.166 5	2.561 0
10	-0.016 7	2.638 5	0.167 0	2.655 2

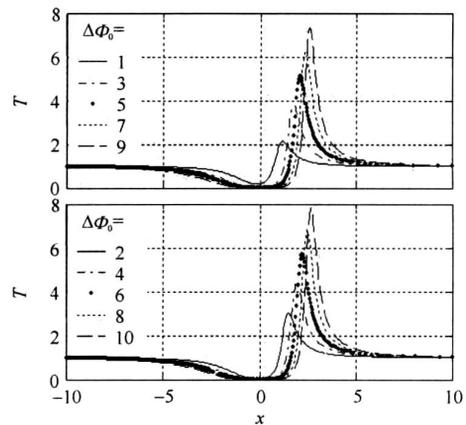


Fig. 4 Z-scan transmittance curves with purely nonlinear refraction

图 4 仅考虑折射非线性相移情况下的 Z-scan 透过率曲线

3 结 论

通过对 Z-scan 曲线的对称性变化特点的分析, 我们得到了其对称性受三阶非线性折射相移的影响更大的结论。对具有强饱和和吸收和弱自聚焦特性的非线性介质, 其 Z-scan 曲线将失去典型的类色散特点。透过率曲线将全部位于 $T = 1$ 的上方, 伴随着谷的消失将在其前后几乎对称的位置出现两个透过率峰。另外, 对曲线特征参数随非线性相移变化规律进行了数值计算, 结果表明, 曲线所对应的非线性相移与其谷的位置的乘积近似为常量 0.166。

参考文献:

[1] Shiek-Bahae M, Said A A, Van Stryland E W. High sensitivity single beam n_2 measurement[J]. *Opt Lett*, 1989, **8**(14): 955-957.
 [2] Shiek-Bahae M, Said A A, Wei T H, et al. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1990, **26**(4): 760-769.
 [3] Chen S Q, Liu Z B, Zang W P, et al. Study on Z-scan characteristics for a large nonlinear phase shift[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, **22**(9): 1911-1916.
 [4] Zang W P, Tian J G, Liu Z B, et al. Analytic solutions to Z-scan characteristics of thick media with nonlinear refraction and nonlinear absorption[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, **21**(1): 63-66.

- [5] Kwak C H, Lee Y L, Kim S G. Analysis of asymmetric Z -scan measurement for large optical nonlinearities in an amorphous As_2S_3 thin film [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, **16**(4) : 600-604.
- [6] Zang W P, Tian J G, Liu Z B, et al. Comparison of the solutions from a novel variational method with numerical results for the study of beam propagation in a Kerr medium with nonlinear absorption[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(9) :722-724.
- [7] Zang W P, Tian J G, Liu Z B, et al. Variational analysis of Z -scan of thick medium with an elliptic Gaussian beam[J]. *Appl Opt*, 2003, **42**(12) :2219-2225.
- [8] Ghatak A K, Thyagarajan K. Contemporary optics[M]. New York: Plenum Press,1978: 208-211,304-310.
- [9] Belanger P A. Beam propagation and the $ABCD$ ray matrices[J]. *Opt Lett*, 1991, **16**(21) : 196-198.
- [10] Ma J, Wang S M, Shen D Z, et al. The study of third order nonlinearities in ZnCdSe-ZnSe/ GaAs MQWs using Z -scan[J]. *Solid State Commun*, 1996, **97**(11) : 961-963.

Effect of nonlinear phase shift on symmetry of Z -scan curves

WANG Chao^{1,3}, TANG Tian-tong¹, KANG Yi-fan²

(1. Key Lab of Electronic Physics and Device of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. Institute of Photonics and Photon Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Based on the simulated results of normalized Z -scan transmittance by using $ABCD$ formalism and q parameter, analysis on the variational characteristics of Z -scan curves with nonlinear phase shifts proves that the asymmetry of the curve is more greatly affected by nonlinear refractive phase distortion than by nonlinear absorptive one, and that the Z -scan curves of a certain media with strong saturated absorption and weak self-focusing third-order nonlinearity will not hold the dispersive-like characteristics any more. With the absorptive nonlinear phase shift of 0.9 and coupling factor of -10 in the transmittance expression, the fitting with the experimental data for ZnCdSe-ZnSe (MQWs) of 1 μm thickness conducted with 532 nm TEM_{00} brought in almost the same results of third-order nonlinearity absorptive and refractive coefficients of $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{W}$ and $-8.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{W}$ respectively as what J. Ma et al. have got. And also, the numerical analysis of its asymmetry brought out a quantitative result: the product of the corresponding curve phase shift and its valley position is approximately a constant of 0.166.

Key words: Nonlinear phase shift; Z -scan method; Quantitative analysis; Dispersive-like; Asymmetry